



Nombrado Doctor Honoris Causa el día 28 de enero de 2005

En busca de la energía sostenible

Veniam orando peto.

Excelentísimo señor Rector Magnífico, excelentísimas e ilustrísimas autoridades, colegas y amigos:

Es para mi un alto honor recibir el grado de Doctor Honoris Causa por esta prestigiosa universidad que agradezco a Vuestra Magnificencia Excelentísima como corresponde.

También es una satisfacción compartir claustro con mis colegas del Departamento de Electrónica dignamente representados por la Profesora D^a Carmen Vázquez, a quienes en tan alta estima tengo, y en particular a mi padrino el profesor doctor D. Emilio Olías, que nos ha ofrecido una descripción de mi actividad que aunque exagerada debo agradecer, máxime cuando se ha tomado el trabajo de buscar, no sé como, muchos detalles que yo ni siquiera recordaba. A todos ellos, y a él de modo especial, mi agradecimiento sincero.

Por último, en un momento en el que se me premian méritos reales o percibidos, no quisiera dejar de señalar y agradecer el cálido apoyo que he recibido de mi familia, sobre todo de mi esposa María del Carmen y también de mis hijos Ignacio y Sofía. Tampoco quisiera olvidar a mis colaboradores del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid quienes sin duda merecen mucho de lo que se me otorga.

Vamos a dar por sentado que la preservación de la especie humana y el bienestar de sus individuos son valores fuera de discusión, siendo corolario de estos valores la solidaridad intergeneracional. También, que la energía ha sido y sigue siendo fundamental para el actual bienestar de la sociedad y componente indispensable para extender este bienestar a colectividades numerosas, principalmente en países en desarrollo que hoy en gran medida carecen de él. Por último —y esta afirmación es menos universalmente aceptada aunque de momento me abstendré de defenderla— la solidaridad intergeneracional requiere un cambio de modelo energético, ya que el modelo presente es el principal responsable del incremento de dióxido de carbono en la atmósfera, responsable principal, a su vez, de un cambio climático ya en marcha del que la mitigación de sus efectos más nocivos requiere reducir de modo drástico y lo antes posible la emisión de dióxido de carbono.

La tesis que vamos a defender es que el efecto fotovoltaico va a constituir a lo largo de la primera mitad de este siglo y quizás ya a lo largo de su primer tercio una fuente energética capaz de suministrar posiblemente la tercera parte de la electricidad mundial, con reducción del 80% o más del dióxido de carbono producido por unidad de energía.

El primer científico de quien tenemos noticia que observara interacción de la luz y la electricidad es Alexandre Edmond Becquerel, hijo de Antoine César, soldado de Napoleón en España, quien siendo muy joven presentó sus descubrimientos en 1839 a la Academia de Ciencias de París en un artículo titulado “Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire au moyen de courants électriques”. Pero eran tiempos en los que la curiosidad científica que Volta estimulara desde al menos 1777 se centraba todavía en descubrir la naturaleza de la electricidad. Hubo que esperar al desarrollo de la telegrafía eléctrica —que en 1787 iniciara Agustín de Betancour con la instalación del primer telégrafo eléctrico entre Madrid y Aranjuez— para que en el último tercio del siglo XIX cristalizara una naciente industria de telecomunicaciones dedicada al tendido de cables submarinos que suscitaron el problema de localizar sus averías en lugares difícilmente accesibles a lo largo de muchos kilómetros.

En 1873 Willoughby Smith —un ingeniero inglés que usaba unas resistencias de selenio para esta localización— observó que sus medidas se falseaban por modificación de la resistencia eléctrica cuando el sol las iluminaba. Publicó sus observaciones en el Journal of the Society of Telegraph Engineers en un artículo titulado “The action of the light on selenium”, estimulando por todo el mundo una serie de investigaciones como las del profesor José Rodríguez Mourelo, de la madrileña Escuela Central de Artes y Oficios, publicadas en Madrid en 1883 en el libro titulado La radiofonía: estudio de una nueva propiedad de las radiaciones en el que tienen un lugar destacado las dedicadas al fotófono, un

dispositivo que, usando las propiedades fotoeléctricas del selenio, buscaba una transmisión del habla a larga distancia.

Pero quizás la más importante de ellas por el prestigio de su autor, fue la investigación que el empresario e ingeniero alemán Werner von Siemens publica en el número de mayo de 1875 de la prestigiosa revista de la Academia de Ciencias de Berlín. Fue él quien difundió entre el mundo científico los resultados de Smith. Poco después, en 1883, el norteamericano Fritts fabrica con selenio lo que podría considerarse la primera célula solar hecha con el propósito de convertir la luz en electricidad.

Sin embargo, la verdadera naturaleza de la fotoelectricidad permanece ignota hasta que Albert Einstein la desvela en su "Über einen Erzeugung und Erwandlung des Lichtes betreffen den heuristischen Gesichtspunkt" publicada en 1905 —hoy hace cien años— en los prestigiosos *Annalen der Physik*, y que en 1921 le vale el Premio Nobel con la mención "Por sus servicios a la Física Teórica y especialmente por su descubrimiento del efecto fotoeléctrico."

Sin embargo habrá que esperar todavía casi 50 años más, hasta que en los laboratorios Bell Telephone de EEUU —en la estela de la importantísima invención del transistor por Shockley, Bardeen y Brattain— se produzca un invento fundamental. Darryl Chapin —un ingeniero encargado de desarrollar una fuente aislada de electricidad para la alimentación remota de las líneas de telecomunicación— juntamente con el físico Calvin Fueller y el químico Gerald Pearson publican en Junio de 1954 un famoso artículo en el que, usando el nuevo silicio ultra puro monocristalino, describen la primera célula solar de rendimiento razonable —un 6%— suficiente a su juicio para hacer económicamente viable entonces su utilización en las aplicaciones de telecomunicación de interés para su compañía. El prestigioso *New York Times*, en su número de 26 de Abril de 1954 publica un artículo titulado "Vast Power is Tapped by Battery Using Sand Ingredient".

Para tener una célula solar hacen falta dos cosas: por una parte un material semiconductor. Estos materiales se caracterizan por tener dos bandas o rangos de energía —la banda de valencia y la banda de conducción, ésta última más energética— separadas por una banda prohibida. Por lo general los electrones están en la banda de valencia pero los fotones de la luz pueden gastar su energía desapareciendo, para bombearlos desde la banda de valencia a la de conducción, donde tienen más energía.

Por otra parte, hacen falta unos contactos selectivos, uno de ellos a la banda de conducción por donde puedan salir los electrones más energéticos que luego pierden esta energía adicional en realizar un trabajo útil —como mover un motor o encender unas luces— para retornar al semiconductor por el otro contacto selectivo con la banda de valencia. Los contactos selectivos se hacen depositando ciertos metales en regiones del semiconductor dopadas de forma adecuada. En silicio se dopan con fósforo para el contacto de la banda de conducción o con boro para el de la banda de valencia. La existencia de la banda prohibida es fundamental: impide la desexcitación de los electrones energizados por la absorción de los fotones al no existir partículas suficientemente energéticas capaces de recoger la energía en exceso que llevan estos electrones. Para mantener la banda prohibida verdaderamente limpia de niveles permitidos, impidiendo así que aparezcan fonones capaces de recoger la energía en exceso de los electrones, se necesita que el silicio sea muy puro —del orden de un átomo de impureza cada mil millones de átomos de silicio— y estructuralmente bien constituido, con todos sus átomos colocados en ordenadas filas de más de diez millones de átomos de fondo. Todo ello da lugar a que el coste de las células solares sea alto.

Las primeras pruebas con células solares como generadores de energía las realiza Chapin, en Americus, Georgia, pero la Bell Telephone decide no utilizarlas por culpa de los pájaros, que las ensucian y picotean dañando así el encapsulado de aquellos primitivos módulos. Es entonces cuando los rusos —quienes ya en 1957 habían desarrollado una excelente célula de silicio— en el *Sputnik III* y los americanos en el *Vanguard*, ambos en 1958, deciden usarlas para producir la energía que necesitaban para sus ingenios espaciales. Es un claro éxito y durante un par de décadas las células solares permanecen confinadas al estimulante pero limitado ámbito de la tecnología espacial.

Pero hay que esperar al choque petrolero de 1973 para que se conmueva la conciencia de los países occidentales. Así, en 1974 el gobierno estadounidense convoca una conferencia en Cherry Hill en la que declara que la investigación fotovoltaica merece ser financiada con fondos públicos, lo que es seguido por varios países industrializados. Desde entonces y en el plazo de unos cinco años se sientan las bases para constituir una industria capaz de fabricar células solares para usos terrestres con perspectivas de alcanzar precios abordables.

En España, donde nos habíamos ocupado desde 1969 de instalar un Laboratorio de Semiconductores en la Escuela de Telecomunicación de Madrid —a la sazón capaz de fabricar transistores de varios tipos e incluso pequeños circuitos integrados— tuvimos la suerte de ser seleccionados para formar parte de la misión Fronteras de la Ciencia de cooperación Hispano Estadounidense. Así en 1975 desarrollamos con Tomás Rodríguez la primera célula solar fabricada en España con fondos de Ayuda Americana. En 1976, con fondos de la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica —la CAYCIT— invento la célula bifacial que convertía en electricidad la luz recibida por ambas caras y tras verificar la importancia de la energía que se recibía por la cara posterior reflejada por el entorno y el importante aumento del rendimiento efectivo que ello conllevaba, dirigimos en 1980 la fundación en Málaga —mi patria chica— de la empresa Isofotón para fabricarla. Es una de las más antiguas de Europa y, año más, año menos, contemporánea de las que surgen en EEUU. Hoy Isofotón factura más de 120 millones de Euros y ocupa a unos de 700 empleados.

Esta tarea fundacional no hubiera sido posible sin el buen hacer técnico de Gabriel Sala y de Javier Eguren, ambos antiguos alumnos míos de grado y discípulos de doctorado, y sin el estímulo y búsqueda de socios de mi hermano Alberto.

Sin embargo, todas estas empresas —también Isofotón— sufren un largo periodo de pérdidas debido a la pequeñez que tenían los mercados. De esta travesía del desierto pocas sobreviven y yo mismo abandono la Isofotón a principio de los noventa. Pero a mediados de esa década los mercados han crecido ya lo bastante como para permitir a unas pocas —Isofotón entre ellas— obtener ganancias, lo que produce a su vez una madurez de fabricación que resulta hoy en una expansión que no es exagerado calificar de explosiva. En 1999 se había completado en el mundo —en millares de pequeñas instalaciones— el primer gigavatio de células solares. Se habían necesitado veintitrés años. El segundo se completó en 2002, solo dos años y medio después. A final del 2003 ya se había completado el tercero. Es posible que en este año de 2005 se lleguen a instalar dos gigavatios y medio y que hacia el final de la década se estén instalando más de diez gigavatios anuales.

Para facilitar la comparación, señalemos que el tamaño típico de una central nuclear es de un gigavatio pero el mayor número de horas de utilización de la central nuclear —entendamos que un generador solar sólo produce electricidad mientras luce el sol— hace que se necesiten unos siete gigavatios de instalaciones solares para igualar la energía producida por una planta nuclear de un gigavatio, de manera que la totalidad de las instalaciones solares existentes hoy equivalen, más o menos, a media planta nuclear, de las 440 que hay en el mundo totalizando 362 gigavatios .

En consecuencia, la electricidad solar contribuye todavía inapreciablemente a la generación de electricidad pero ya hoy empieza a ser notada y su velocidad de crecimiento asombra a muchos y atrae inversionistas. Una extrapolación de las tasas de crecimiento actuales predice una penetración elevadísima en sólo diez años a partir de ahora. Pero por su misma magnitud, unas tasas de crecimiento como las actuales no pueden durar tanto.

Hemos desarrollado un modelo que combina la curva de aprendizaje con la elasticidad de la demanda y que con valores verosímiles de ambos parámetros predice que aunque la velocidad de crecimiento del mercado disminuirá en unos años, la penetración de la energía solar fotovoltaica para mediados de siglo acaparará una fracción no despreciable de la demanda energética.

Para confirmar este pronóstico conviene fijarse en quiénes son los fabricantes de células solares. Centrándose en los diez mayores —que totalizan el 81% de la producción mundial de células solares— hay entre ellos gigantes de la industria electrónica, como los japoneses Sharp, Kyocera y Sanyo; o americanos como General Electric; hay también compañías petroleras como la British Petroleum y Shell; o empresas de automoción o eléctricas como la japonesa Mitsubishi y la alemana RWE respectivamente. Entre ellas hay sólo dos empresas dedicadas exclusivamente a la energía solar, Isofotón que es la única generada en una universidad y la alemana Q-Cells producto de una próspera operación de capital riesgo.

En 2003 Isofotón fue la séptima compañía mundial por el número de células solares fabricadas, la segunda de Europa y la mayor de España. Exporta el 75% de su producción a más de 50 países, siendo Alemania su primer mercado, por encima del propio mercado nacional. En la actualidad se está terminando una segunda planta en el parque tecnológico de Málaga que triplicará su capacidad de producción. Gracias a ella y a la British Petroleum, que tiene en Alcobendas una de sus cuatro fábricas, nuestro país es hoy la cuarta potencia mundial en fabricación de células solares, y responsable, por ello, de contribuir de forma importante al desarrollo de esta tecnología.

El material usado hoy para fabricar células solares es casi siempre silicio, el mismo que se usa para fabricar los chips de la microelectrónica y de la misma pureza. El silicio es un material muy abundante e inocuo que forma una buena parte del suelo que pisamos. Pero la capacidad de ultra purificación —que tradicionalmente se ha usado sólo para la microelectrónica— es limitada. La industria solar es mucho más voraz de silicio que la microelectrónica y ya en el momento actual —pese a su gran diferencia de talla— consume el 40% del silicio ultra puro disponible. Por eso, es hoy muy urgente aumentar esta capacidad de ultra purificación. Además, el silicio solar debería ultra purificarse por medios más baratos y menos consumidores de energía. Por los medios actuales, una célula solar necesita cuatro años de operación para recuperar la energía gastada en su fabricación, aunque su duración es ilimitada y las compañías las garantizan por veinticinco años. Posiblemente esta falta de silicio ultra puro es la más seria barrera que se tiene a corto plazo para un desarrollo fluido de la energía fotovoltaica.

Nosotros, en el Instituto de Energía solar de la Universidad Politécnica de Madrid, estamos atacando este problema por tres vías diferentes. La más a corto plazo, que desarrollamos con Isofotón y el Instituto de Microelectrónica de la Universidad del País Vasco, consiste en el uso de células solares bifaciales que pueden ser muy delgadas, con el consiguiente ahorro de silicio.

Otra vía, en colaboración con Ferroatlántica, que es la segunda productora europea de silicio de grado metalúrgico (menos puro) y con el Instituto de Cerámica de Galicia, consiste en evitar la cloración habitualmente usada para hacer la ultra purificación en fase líquida y que luego requiere una posterior reducción, demasiado consumidora de energía. Una tercera vía, abordada con Isofotón y el Departamento de Química Industrial de la Universidad Complutense, consiste en depositar una delgada capa activa de silicio ultra puro en la que se fabrica la célula solar sobre un sustrato mecánico menos puro en un aparato de nuestra invención que incluye el ciclo completo de purificación y fabricación de célula. Todas ellas son investigaciones de gran alcance tecnológico para las que opinamos que no hemos podido estimular todavía en España el tipo de apoyo que asegure el éxito de un plan de esta importancia.

Pero junto a estos problemas, que hay que resolver para impedir un frenazo en el actual desarrollo de la energía solar, es preciso abordar otros problemas de fondo. La energía procedente del sol es ingente, pero su densidad es relativamente baja, en consecuencia, para su aprovechamiento económico se necesita el mayor rendimiento posible. Sin

embargo, las células solares actuales sólo aprovechan bien los fotones de una determinada energía, es decir, de un solo color. Esto es así porque los fotones con energía inferior a la de la banda prohibida no se aprovechan en absoluto y de los fotones que tienen una energía en exceso sobre la de la banda prohibida sólo se aprovecha como mucho la energía de esta banda. Para corregir este problema hemos establecido y coordinamos un vigoroso programa titulado FULLSPECTRUM, financiado por la Comisión Europea con 8,4 millones de Euros, que aúna la labor de diecinueve centros de investigación europeos con objeto de promover un aprovechamiento completo del espectro solar.

Quizás la línea científicamente más interesante se basa en un nuevo concepto que publiqué con Antonio Martí en 1997 en *Physical Review Letters*. La idea es hacer las células solares en materiales con una banda intermedia de energía dentro de la banda prohibida. Esto permite que además de los bombeos directos de electrones, desde la banda de valencia a la de conducción, puedan existir bombeos en dos pasos, uno desde la banda de valencia a la intermedia, con absorción de un fotón de menor energía y otro desde ella a la de conducción con absorción de un segundo fotón de energía aún menor. Los rendimientos esperables con estas nuevas células incrementan en un 50% los de las células actuales pero la búsqueda de los materiales apropiados es un problema científico y tecnológico de gran envergadura. Muchos científicos se han puesto a trabajar en ello en el mundo. Nosotros hasta ahora hemos podido demostrar experimentalmente los principios de esta nueva célula mediante prototipos realizados para nosotros en la Universidad de Glasgow usando puntos cuánticos —átomos artificiales fabricados por nanotecnología— pero los puntos cuánticos no pueden dar mucho rendimiento porque su número será siempre pequeño. Científicos de nuestro Instituto investigan por cálculo de bandas, aleaciones que muestren esta banda intermedia, y todos los indicios señalan al titanio que en una matriz de arseniuro de galio podría quizás producir este tipo de banda. Pero queda todavía por aclarar si estos átomos no producirán una vía de desexcitación que reduzca o anule las ventajas de esta banda intermedia para la absorción de fotones.

En todo caso otra línea más convencional y económicamente muy prometedora que seguimos en el Instituto consiste en construir apilamientos de células solares de distintos semiconductores, cada uno adaptado a los fotones de una determinada energía. Estos apilamientos pueden ser realizados en forma monolítica, es decir formando un único cristal semiconductor de composición variable.

Ciertamente, estas soluciones son en principio caras pero el uso de luz concentrada —otro área en el que creemos que España puede jugar un papel pionero— puede abaratarlas mucho resultando así una ventaja de precio que puede ser importante debido a su alto rendimiento.

En resumen, la electricidad fotovoltaica se está desarrollando hoy a pasos agigantados. Una importante razón de este rápido progreso se debe a su carácter modular que convierte a cientos de millones de familias en clientes potenciales de esta tecnología en contraste con las decenas de miles de compañías que, como mucho, son los clientes de las soluciones tradicionales.

Y este crecimiento tiene lugar a pesar de que los costes son del orden de cinco veces mayores que los de las tecnologías prevalentes. Los gobiernos y los particulares están corriendo con este sobrecoste que para los particulares de los países desarrollados no representa mayor esfuerzo que el de demorar por tres años el cambio de coche. Pero naturalmente, el uso masivo de estos productos en países del tercer mundo —donde los incrementos de consumo energético tienen que ser notables para permitir su desarrollo— requiere una reducción importante de costes.

Con el crecimiento del mercado los costes decrecerán sin duda pero existe una controversia sobre si los incrementos de mercado bastarán por sí solos para alcanzar costes competitivos con la electricidad prevalente. Nuestra opinión, sustentada por el modelo prospectivo que antes indicamos, es que no es suficiente. Al contrario, la fórmula más segura para alcanzar la penetración global de la electricidad solar fotovoltaica es que se produzca un invento radical ya que en el ambiente intelectual de hoy —que tiene conciencia de la aguda necesidad del mismo y que se alimenta del progreso de la ciencia y de la técnica— la historia nos enseña que estos inventos se producen ineludiblemente. Es más, se producirá a no mucho tardar; puede incluso que en realidad ya se haya producido aunque su importancia no se haya revelado plenamente todavía. FULLSPECTRUM —el proyecto de la Comisión Europea con diecinueve centros de investigación que coordinamos— es un intento de crear un ambiente intelectual favorable al florecimiento de estos avances.

Por todo lo dicho afirmamos nuestra tesis de que estamos asistiendo a una revolución energética que dará lugar a que a lo largo de este siglo, probablemente antes de la mitad, la energía solar permita un desarrollo equitativo de la humanidad reduciendo al tiempo la emisión de efluentes nocivos que hagan sostenible este desarrollo. Ita dixi.

Reconocimiento: mi hijo Ignacio me proporcionó datos sobre los pioneros de la técnica fotovoltaica.